

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Hospodaření s přírodními zdroji



Dalibor Tomášek

Identifikace projevů alkalicko-křemičité reakce a zpožděné tvorby ettringitu mikroskopickými
metodami v betonu se zvláštním zřetelem na mostní konstrukce
Identification of alkali-silica reaction and delayed ettringite formation of concrete (with
special attention to bridges) by microscopic methods

Bakalářská práce

Vedoucí závěrečné práce/Školitel: prof. Mgr. Richard Přikryl, Dr.

Praha, 2017

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 23. 8. 2017

Podpis

Abstrakt

Beton jako univerzální a velmi rozšířená stavební hmota zákonitě podléhá různým degradačním procesům. Mezi nejvíce rozšířené patří alkalické a síranové rozpínání. Existuje více typů těchto reakcí: alkalicko-karbonátová, alkalicko-silikátová, síranové rozpínání za účasti ettringitu nebo thaumasitu. V této bakalářské práci jsou popsány podmínky vzniku a mechanismy působení těchto reakcí, jakož i jejich důsledky a možnosti preventivních opatření. Pozornost je také věnována možnosti rozlišení projevů síranového rozpínání a alkalického rozpínání. Dopad výskytu alkalicko-křemičité reakce je dokumentován na příkladu několika mostních konstrukcí. Výskyt alkalické reakce kameniva a síranového rozpínání zároveň v jedné konstrukci má synergický efekt a ztěžuje určení prvotní příčiny rozpínání. Metody mikroskopického pozorování poškozených betonových konstrukcí, které jsou vhodné pro určení typu reakce, zahrnují např. petrografické metody, zkoumání výbrusů nebo nábrusů pomocí optické mikroskopie nebo elektronové mikroskopie s mikroanalýzou (SEM/EDS), či počítačová analýza obrazu leptaných nábrusů.

Abstract

Concrete is a universal, wide-spread construction material which is naturally subjected to various types of deterioration. Two of the most common deterioration mechanisms are alkali-aggregate reaction (AAR) and sulphate attack. Several varieties of these reactions can be recognised: alkali-carbonate reaction (ACR), alkali-silica reaction (ASR), delayed ettringite formation (DEF) or formation of thaumasite instead. Within this bachelor thesis, conditions of appearance and mechanisms of deterioration are described, as well as possible consequences and preventive measures. Special attention is given to the methods of distinction between alkali-silica reaction and delayed ettringite formation. Great impact of alkali-silica reaction is documented on the example of a few affected bridges. Occurrence of alkali-aggregate reaction and sulphate attack in a single construction at once leads to synergistic effect. Determination of the primary cause of deterioration is difficult. Appropriate microscopic investigation methods for proper detection of the reaction type are shown; they include: petrographic analysis, observation of thin sections or polished sections in optical light microscope and/or scanning electron microscope with energy dispersive spectroscopy (SEM/EDS).

OBSAH

Seznam obrázků	v
Seznam tabulek	vii
1. ÚVOD	1
1.1. Beton a jeho stabilita.....	1
1.2. Cíle bakalářské práce.....	1
2. DEGRADAČNÍ CHEMICKÉ REAKCE KAMENIVA V BETONU	2
2.1. Obecně.....	2
2.2. Reakce kameniva v alkalickém prostředí	2
2.2.1. Úvod.....	2
2.2.2. Alkalicko-karbonátová reakce.....	2
2.2.3. Alkalicko-křemičitá reakce	4
2.2.3.1. Podmínky vzniku a mechanismus působení.....	4
2.2.3.2. Důsledky alkalicko-křemičité reakce a možnosti předcházení jejímu vzniku.....	5
2.2.3.3. Alkalicko-křemičitá reakce v betonu mostních konstrukcí	7
2.3. Síranové rozpínání	9
2.3.1. Obecně.....	9
2.3.2. Síranové rozpínání za účasti ettringitu	9
2.3.2.1. Typy ettringitu v betonu	9
2.3.2.2. Zpožděný vznik ettringitu.....	9
2.3.2.3. Laboratorní ověřování náchylnosti k tvorbě ettringitu	10
2.3.3. Síranové rozpínání za účasti thaumasitu	11
2.3.3.1. Obecně.....	11
2.3.3.2. Podmínky vzniku.....	11
2.4. Souběh alkalického a síranového rozpínání.....	13
3. MOŽNOSTI MIKROSKOPICKÉHO VÝZKUMU BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ POSTIŽENÝCH CHEMICKÝMI REAKCEMI.....	14
3.1. Základní přístupy.....	14
3.2. Příklad výsledků mikroskopického studia mostní betonové konstrukce v České republice.....	15
4. ZÁVĚR.....	18
5. LITERATURA.....	19

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Příklady vzniku reakčních produktů při tzv. alkalicko-karbonátové reakci zaznamenaných v kanadských betonech. Převzato z Katayamy (2010).

Obr. 2. Schéma postupu vzniku produktů alkalicko-křemičité reakce dle rovnic uvedených v textu. Jedná se o modelovou představu, která předpokládá homogenní složení reaktivní středové částice a tvorbu tzv. vyzrálých a nevyzrálých alkalicko-křemičitých gelů. Nevyzrálý alkalický křemičitan pod povrchem pomalu reaguje s vápenatými ionty za vzniku pevného reakčního lemu, pod jehož povrchem dále postupuje alkalicko-křemičitá reakce. Po protření reakčního lemu dochází k vypuzení části gelu do nově vzniklé mikrotrhliny. Převzato z Ichikawy (2009).

Obr. 3. Schéma rozvrstvení poruch v betonové konstrukci v důsledku rozvoje alkalicko-křemičité reakce. Převzato z Courtiera (1990).

Obr. 4. Celkový pohled na most Elgeseter (Trondheim, Norsko). Převzato z Jensena (2004).

Obr. 5. Mikroskopický snímek vzorku betonu z most Elgeseter, dokumentující rozevřenou mikrotrhlinu protínající částici kameniva – pískovce (vlevo) a cementové pojivo (vpravo), vyplněnou alkalicko-křemičitým gelem (pozice vyznačena bílými šipkami). Převzato z Jensena (2004).

Obr. 6. Závislost mezi dobou výstavby mostu a množstvím alkalicko-křemičitého gelu v betonu. Převzato z Lukschové et al. (2009).

Obr. 7. Závislost mezi dobou výstavby mostu a množstvím alkalicko-křemičitého gelu v betonu. Převzato z Lukschové et al. (2009).

Obr. 8. Příklad porušení betonového mostního pilíře trhlinami v důsledku rozvinuté zpožděné tvorby ettringitu (bez jakýchkoliv známek ASR). Pilíře byly vystavěny betonem, jehož pojivem je cement s vysokou počáteční pevností (ASTM typ III). Převzato z Thomase et al. (2008).

Obr. 9. Příklad rozdílného rozpínání experimentálních vzorků malt s různými obsahy SO_3 – v případě vzorků označených jako mortar I a mortar II se jednalo o maltové směsi s velmi nízkým obsahem SO_3 (2,29, resp. 0,19 hm. %) pouze s přídavkem sádrovce (jako regulátoru tuhnutí) u vzorku mortar I, v případě vzorku Ia se jednalo o maltovou směs se zvýšeným obsahem SO_3 (3,76 hm. %), zajištěnou přidáním sádrovce a síranu draselného. Převzato z Owsiake (2010).

Obr. 10. Příklad thaumasitu v nábrusu 40 mm v průměru zhotoveném z poškozeného cemento-betonového krytu dálnice v Anglii. Thaumasit tvoří bílé lemy (pozice vyznačeny šipkami) kolem částic hrubého kameniva (vápence).

Obr. 11. Stěna tunelu přehrady Mequinenza (Španělsko) (snímek (a)), jejíž beton (s použitím vápence jako hrubého kameniva) je silně degradován sírany s draslíkem a vápníkem (mikroskopický snímek ze SEM (b) a směsí sádrovce, kalcitu a thaumasitu (snímek (c))). Vznik thaumasitu byl podpořen rozpadem okolních hornin, obsahujících vložky lignitu s vysokým podílem sulfidů. Převzato z Chinchón-Payá et al. (2015).

Obr. 12. Výsledky modelování s využitím laboratorních experimentálních dat, které ukazují na možný prvotní rozpínání z důvodu tvorby zpožděného ettringitu a navazujícího rozvoje alkalicko-křemičité reakce. Převzato z Martina et al. (2010).

Obr. 13. Příklad závislosti mezi mírou rozpínání a četností poruch, zjištěných kvantitativním pozorováním pomocí elektronové mikroskopie. Převzato z Rivarda et al. (2002).

Obr. 14. Příklad zjištěné závislosti mezi plošným rozsahem částic kameniva, vykazujících známky rozpouštění v důsledku alkalicko-křemičité reakce a mírou rozpínání (a), a srovnání nízké míry korelace mezi rozpínáním těch samých vzorků a výsledky zrychlené chemické zkoušky (b, c). Převzato ze Šachlové et al. (2017).

Obr. 15. Příklad výsledků studia experimentálních maltových směsí s různě reaktivním kamenivem (zleva doprava reaktivita kameniva roste – a-e = křemen z pegmatitu, f-j = kvarcit, k-o = metadroba, p-t = rohovec) zjištěné pomocí elektronové mikroskopie. První řada snímků dokumentuje stav před vznikem reakce, druhá řada stav po jednom dni působení alkalických roztoků, třetí řada stav po 5 dnech, čtvrtá řada stav po 9 dnech a poslední, pátá řada stav po 14 dnech působení alkalických roztoků. Převzato ze Šachlové et al. (2017).

Obr. 16. Detail mikrostruktury betonu z podpůrné konstrukce Žďákovského mostu (vývrt A5, výbrus A5-II-1) výrazně porušené tahovou mikrotrhlinou, kterou téměř bezzbytku vyplňuje ettringit (vyznačen červenou šipkou) a alkalicko-křemičitý gel (vyznačen zelenou šipkou). Z tohoto snímku lze usuzovat na to, že ettringit se vytvořil před alkalicko-křemičitým gelem; síranové rozpínání pakl lze považovat za prvotní příčinu křehkého tahového porušení mikrostruktury betonu. Převzato z Příkryla (2016).

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Charakteristika zpožděné tvorby ettringitu v závislosti na zdroji síranu (upraveno dle Collepariho 2003).

1. ÚVOD

1.1. Beton a jeho stabilita

Beton patří mezi nejuniverzálnější a nejvíce rozšířené stavební hmoty moderní doby (Aïtcin 2000, John 2003, Struble a Godfrey 2004, Naik 2008). K jeho oblibě ve stavebnictví přispívá možnost přípravy ustálenými recepturami a používání standardizovaných typů pojiv (cementu) i předepsaných typů plniv (drobného i hrubého kameniva) (Prentice 1990, Lorenz a Gwosdz 2003), stejně tak i rychlost výstavby. Význam betonu v moderním stavitelství dokládá skutečnost, že horniny pro výrobu stavebního kameniva a suroviny pro výpal anorganických stavebních pojiv reprezentují přibližně polovinu všech těžených nerostných surovin v současnosti (Přikryl et al. 2017, Přikryl 2017). Současná odhadovaná světová poptávka po kamenivu přesahuje 53 mld. tun, přičemž pro výrobu betonových směsí je zapotřebí více než 31 mld. tun (Anonym 2013).

Největším úskalím při přípravě betonu je však petrografická a mineralogická pestrost použitého kameniva (těženého přírodního i drceného), jež má bezpochyby vliv na další vlastnosti a stabilitu betonu (Van Loon 2002). Ta je dále ovlivněna i způsobem či místem použití, kde je beton vystaven vlivům prostředí, v němž je umístěn (Glasser et al. 2008). Beton tedy není inertní stavební hmotou, ale naopak snadno podléhá různým destruktivním procesům, které postihují i ostatní pórovité anorganické stavební materiály, jako je přírodní kámen nebo pálené stavební keramické hmoty (cihlářské výrobky).

K významným destruktivním procesům betonu lze zařadit nejrůznější typy chemických reakcí (Glasser et al. 2008), postihujících různé složky betonu, zejména však kamenivo. I když je kamenivo považováno za v podstatě inertní plnivo betonu, řada běžných horninotvorných minerálů je ve vysoce alkalickém prostředí ($\text{pH} > 12$) pórových roztoků v betonu nestabilní (Choquette et al. 1991) a podléhá chemickým přeměnám. Z různých chemických reakcí, postihujících kamenivo, patří k nejvíce rozšířeným alkalické a síranové rozpínání (Swamy 1992, Marchand et al. 2002). Zejména v případě alkalických reakcí kameniva dochází k rozsáhlému porušování mikrostruktury vyzrálého betonu, zhoršení jeho fyzikálních vlastností a snížení trvanlivosti postižené betonové konstrukce (Swamy a Al-Asali 1988, Jones a Clark 1998).

Rozvoj těchto reakcí přináší nemalé ekonomické škody, vyplývající z nutnosti předčasné údržby nebo dokonce výměny postižené konstrukce, jejíž předpokládaná životnost se tak výrazně zkracuje (Gjorv 2003). U většiny betonových konstrukcí je významným faktorem i bezpečnostní riziko (např. Torrenti a Nahas 2010, Al Shamaa et al. 2014) související se zhoršujícími se vlastnostmi.

1.2. Cíle bakalářské práce

Tato bakalářská práce si klade za cíl rešeršní shrnutí dostupné literatury k tématu alkalicko-silikátové reakce a síranového rozpínání (tvorby ettringitu či thaumasitu) v betonu a možnostmi jejich identifikace mikroskopickými metodami. Přes značné množství literatury k tématu porušení betonu alkalicko-křemičitou reakcí či síranovým rozpínáním existuje značné množství původních studií i přehledových článků, avšak jen málo prací se zaměřilo na vzájemné vztahy obou typů reakcí. Tato bakalářská práce se proto věnuje tomuto opomíjenému fenoménu. Kromě základního popisu obou typů reakcí se tato práce soustředila na možnosti identifikace projevů obou reakcí různými analytickými metodami, zejména pak pomocí elektronové mikroskopie s mikroanalýzou.

2. DEGRADAČNÍ CHEMICKÉ REAKCE KAMENIVA V BETONU

2.1. Obecně

Beton, tvořený směsí plniva – kameniva (tj. částicemi drobného a hrubého kameniva pocházejícími z různých typů hornin) a pojivem (tj. hydratovanými částicemi zpravidla portlandského cementu) (McNally 1998), je vystaven účinkům vnějšího prostředí a postupem času podléhá různým změnám. Kromě fyzikálních procesů (např. teplotní změny, mrznutí vody apod.) se velice často vyskytují různé typy chemických reakcí, které vyplývají jak ze samotného složení betonu, tak i z účinku okolního prostředí, kdy jsou betonové konstrukce vystaveny působení různých solí zvnějšku (Brown a Doerr 2000).

Jedním z kritických momentů, ovlivňujících chemickou stálost betonu a jeho složek, je vlastní vysoce alkalické prostředí betonu, které snižuje chemickou stálost řady horninotvorných minerálů (Choquette et al. 1991). Alkalické prostředí pórových vod v betonu ovlivňuje zejména hůře krystalické či amorfní fáze SiO_2 , ale má vliv i na řadu dalších minerálů. Soubor složitých chemických přeměn, které se mohou projevit v různém čase od výstavby, se obecně označuje jako alkalické reakce kameniva. Jejich nejznámějším a nejvíce studovaným typem je potom alkalicko-křemičitá reakce (angl. alkali-silica reaction, ASR) (Swamy 1992).

Druhou významnou skupinou reakcí je tzv. síranové rozpínání, v anglicky psané literatuře často uváděné pod označením zpožděná tvorba ettringitu (angl. delayed ettringite formation, DEF). V tomto případě se jedná o vznik druhotných výplní pórů a trhlin fázemi ze skupiny ettringitu a thaumasitu působením různých mechanismů (Marchand et al. 2002).

2.2. Reakce kameniva v alkalickém prostředí

2.2.1. Úvod

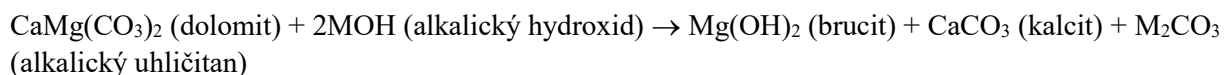
Velmi záhy po prvním popsání případu porušení betonové konstrukce nově vzniklými alkalicko-křemičitými gely (Stanton 1940, Stanton et al. 1942) bylo konstatováno, že se jedná o univerzální problém (Alderman et al. 1947), což v následujících desetiletích potvrdily studie z celého světa (podrobný přehled viz Sims a Poole 2017). V České republice se dané problematice začala věnovat pozornost se značným zpožděním až v 90. letech 20. stol., nejprve v souvislosti s porušením cemento-betonového krytu dálnice D11 spojující Prahu s Poděbrady, posléze studiemi betonů z různých staveb a experimentálního studia (Lukschová et al. 2009, Šťastná et al. 2012, 2013, 2015, Šachlová et al. 2014).

V literatuře se reakce kameniva v alkalickém prostředí popisují buď pod zobecňujícím názvem alkalické reakce kameniva (angl. alkali-aggregate reaction, AAR) či pod dvěma oddělenými označeními (1) alkalicko-karbonátová reakce a (2) alkalicko-křemičitá reakce (Prentice 1990, Swamy 1992, McNally 1998). Pod těmito názvy budou podrobněji popsány v následujícím textu.

2.2.2. Alkalicko-karbonátová reakce

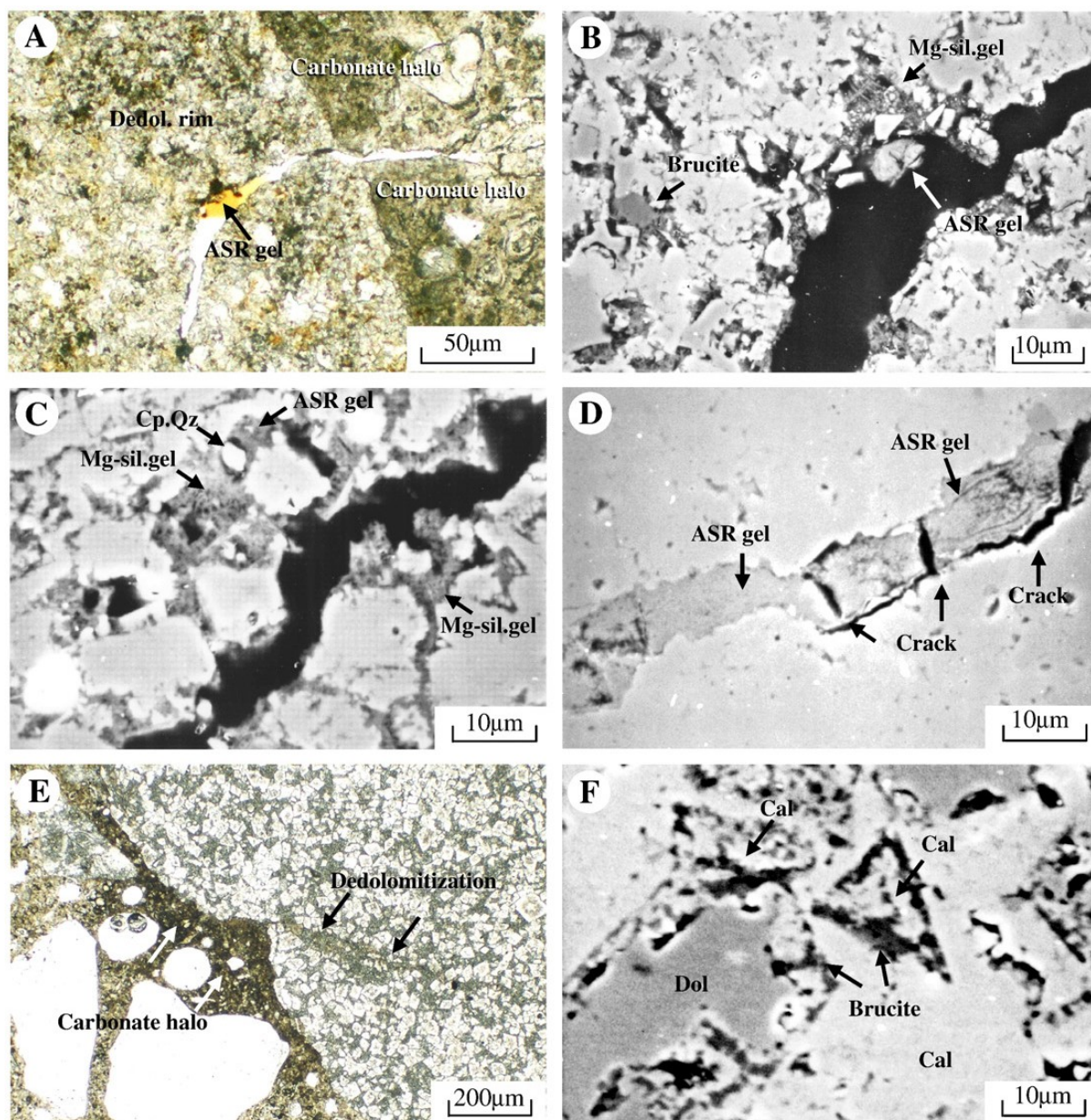
Alkalicko-karbonátová reakce (angl. alkali-carbonate reaction, ACR) je chemická reakce, při níž dochází k porušování betonu s drceným kamenivem vyrobeným z dolomitických vápenců. Reakce byla poprvé popsána v 50. letech 20. stol. (Swenson 1957). Většina autorů se přiklání k tomu, že příčinou expanze betonu s dolomitickým kamenivem je amorfní či kryptokrystalická křemitá hmota rozptýlená v hornině (López-Buendía et al. 2006, Grattan-Bellew et al. 2010, Katayama 2010). Tím by se jednalo o specifický typ alkalicko-křemičité reakce (viz dále), doprovázené navíc dedolomitizací za

vzniku neexpandujících hořečnatých křemitých gelů i brucitu (Obr. 1). Dedolomitizace probíhá podle následující rovnice (Hadley 1961):



Dolomitické kamenivo, náchylné k alkalicko-karbonátové reakci, má následující vlastnosti (Swenson a Gillot 1967): obsah nerozpustného podílu v rozmezí 5 až 25 %, podíl dolomitu na celkové karbonátové složce 40-60 %; hornina navíc musí být značně jemnozrnná (25-30 μm).

Podle jiných názorů může být příčinou expanze rozpínání jílových minerálů rozptýlených v hornině poté, co proces dedolomitizace zvýšil pórovitost a propustnost horniny (Hadley 1961, Gillott 1964, Gillot a Swenson 1969). Pro dolomitické horniny s velmi nízkým obsahem nekarbonátové složky byla vyslovena hypotéza i příspěvku vlastní dedolomitizace k expanzi (Min a Mingshu 1993).



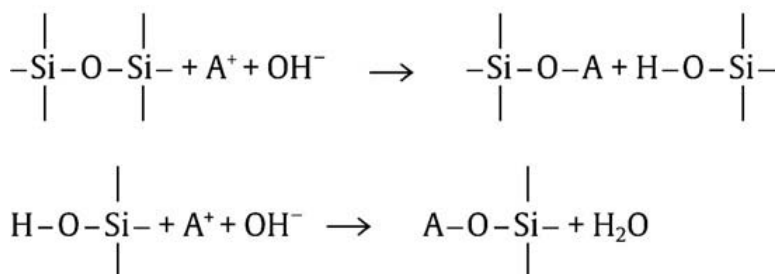
Obr. 1. Příklady vzniku reakčních produktů při tzv. alkalicko-karbonátové reakci zaznamenaných v kanadských betonech. Převzato z Katayamy (2010).

2.2.3. Alkalicko-křemičitá reakce

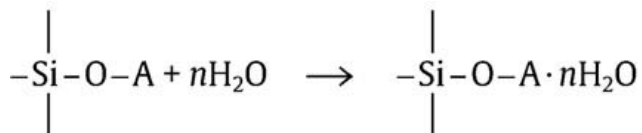
2.2.3.1. Podmínky vzniku a mechanismus působení

Alkalicko-křemičitá reakce (angl. alkali-silica reaction, ASR) představuje chemickou reakci, při níž dochází k rozpadu (rozpouštění) v kamenivu obsažených reaktivních forem SiO_2 (Swamy 1992, Diamond 1997), tvorbě rozpínavého alkalického gelu a následnému porušení mikrostruktury betonu (Swamy 1992, Rajabipour et al. 2015). Aby reakce proběhla, musí být částice kameniva v kontaktu se silně alkalickým prostředím v podmínkách zvýšené vlhkosti. V případě absence jakékoliv ze tří nezbytných složek k rozvoji reakce nemůže dojít (Fourier a Bérubé 2000).

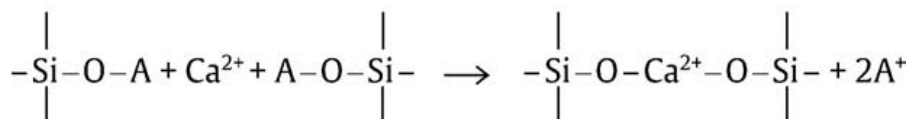
Alkalicko-křemičitá reakce probíhá v několika na sebe navazujících dílčích reakcích, které zahrnují rozpouštění nestabilních forem SiO_2 , vznik nanokoloidního křemičitého roztoku, jeho přechod do gelovité formy a následné rozpínání gelu (Rajabipour et al. 2015). Tento proces lze vyjádřit jak pomocí zobecňujících chemických rovnic, tak pomocí modelových schémat (Obr. 2). V prvním kroku dochází k rozvolnění prostorové sítě siloxanů v částicích kameniva a vzniku alkalického křemičitanu dle níže uvedených rovnic (Ichikawa 2009):

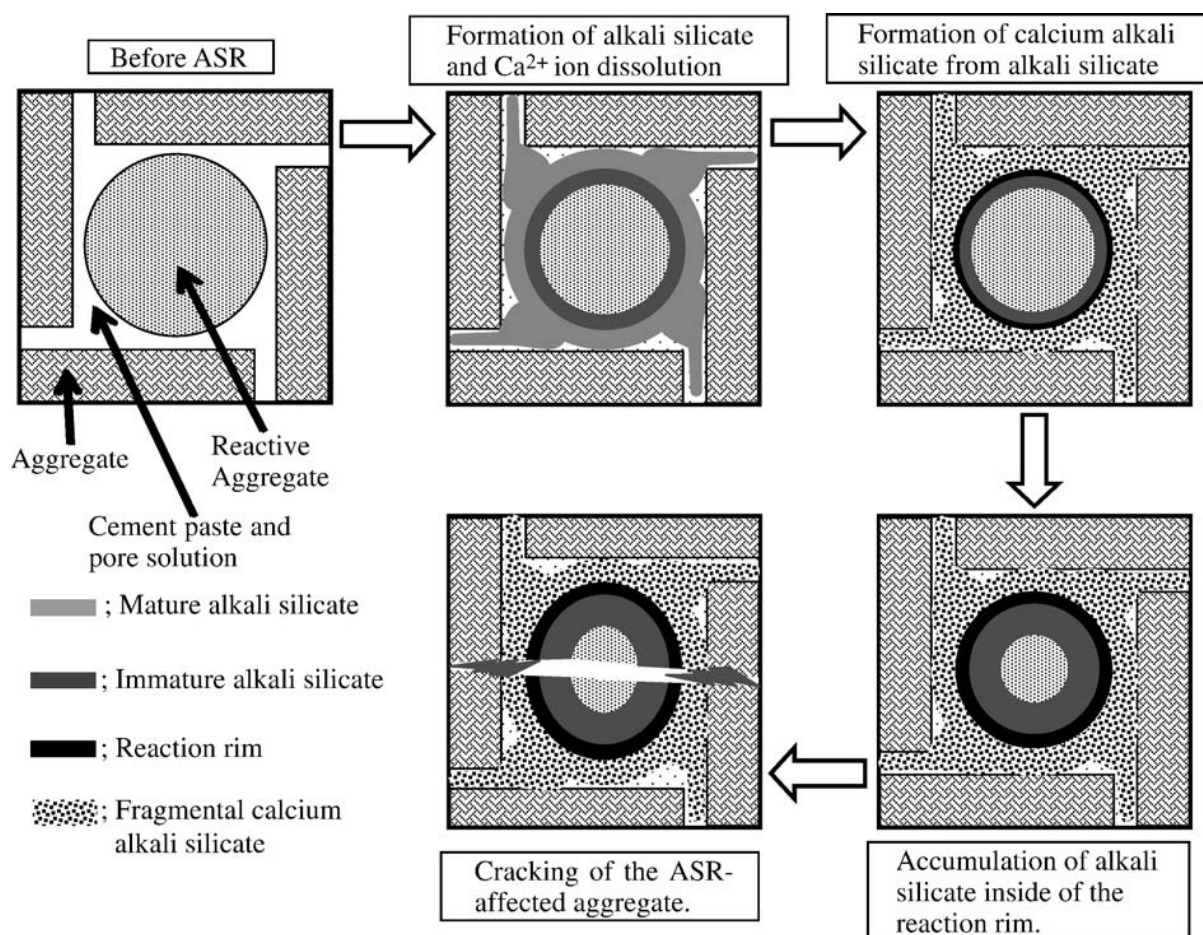


Protože je výsledná oligomerní síť vysoce hygroskopická, dochází k bezprostřední reakci s vodou (vlhkostí) za vzniku hydratovaného alkalického gelu, což lze zapsat následujícím způsobem (Ichikawa 2009):



Hydratační stupeň (n) klesá od povrchu částice směrem dovnitř, tedy souhlasně s postupem reakce. Ve stejném směru by měla též klesat koncentrace alkalických iontů (Ichikawa 2009). Podle tohoto modelu vzniká vyzrálý, vysoce hydratovaný alkalický gel u povrchu částice reaktivního kameniva, přičemž část alkalicko-křemičitého gelu je vypuzena vně a rozpuštěna v pórových roztocích. Méně hydratovaný nevyzrálý alkalický gel naopak zůstává pod povrchem (Obr. 2) (Ichikawa 2009). Vyčerpání $(\text{OH})^-$ vede k postupnému uvolňování Ca^{2+} z $\text{Ca}(\text{OH})_2$, vápenatý ion následně reaguje s dříve vzniklým alkalickým křemičitanem podle rovnice (Ichikawa 2009):



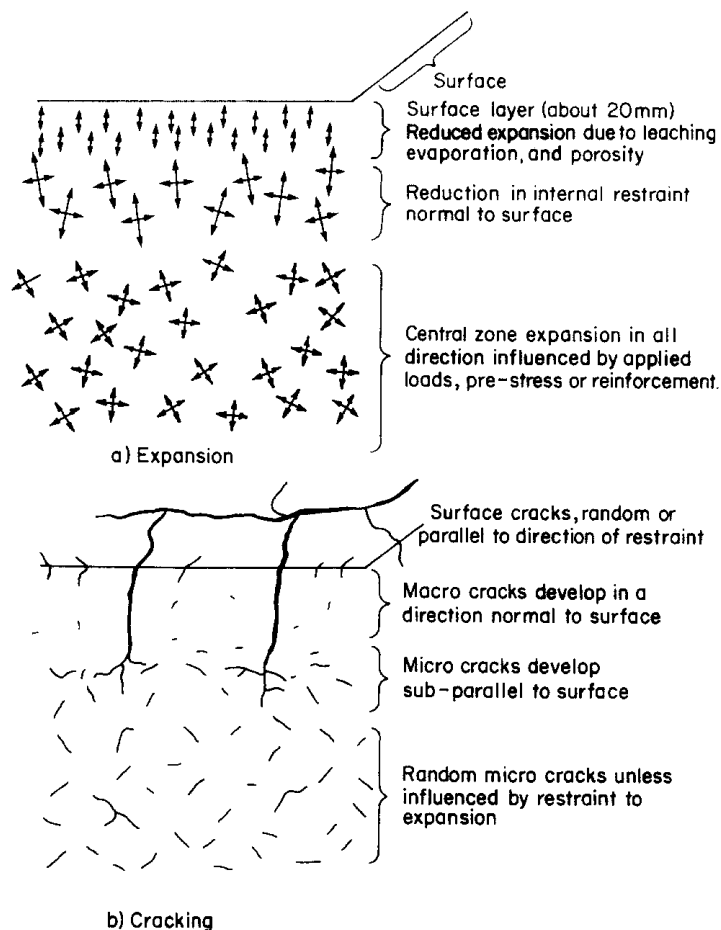


Obr. 2. Schéma postupu vzniku produktů alkalicko-křemičité reakce dle rovnic uvedených v textu. Jedná se o modelovou představu, která předpokládá homogenní složení reaktivní středové částice a tvorbu tzv. vyzrálých a nevyzrálých alkalicko-křemičitých gelů. Nevyzrálý alkalický křemičitan pod povrchem pomalu reaguje s vápenatými ionty za vzniku pevného reakčního lemu, pod jehož povrchem dále postupuje alkalicko-křemičitá reakce. Po protření reakčního lemu dochází k vypuzení části gelu do nově vzniklé mikrotrhliny. Převzato z Ichikawy (2009).

Rozvoj alkalicko-křemičité reakce a rozpustnost různých forem SiO_2 jsou silně závislé na teplotě a pH roztoku, ale též na přítomnosti iontů které účinky zesilují (např. Mg^{2+} , Ca^{2+} , Ba^{2+}), nebo naopak zeslabují (Mg^{2+} v kombinaci s Na^+) (Swamy 1992). Míra rozpustnosti SiO_2 fází je ovlivněna strukturou reaktivních částic, přičemž deformované křemenné struktury s vysokou hustotou mřížkových dislokací se rozpouštějí snáze (Wigum 1995). Rozpustnost je ovlivněna i dostupným měrným povrchem jednotlivých zrn (krystalitů), přičemž se snižující se velikostí zrn náchylnost k poškození alkalicko-křemičitou reakcí roste (Diamond a Thaulow 1974).

2.2.3.2. Důsledky alkalicko-křemičité reakce a možnosti předcházení jejímu vzniku

Jak již bylo popsáno výše, rozvoj alkalicko-křemičité reakce v betonu vede ke vzniku alkalicko-křemičitého gelu, který se rozpíná a ve svém důsledku porušuje mikrostrukturu betonu otevřenými tahovými mikrotrhlinami i makroskopicky pozorovatelnými orientovanými trhlinami, jejichž hustota i pozice je zonální (Obr. 3). Z praktického hlediska potom přítomnost alkalicko-křemičité reakce vede ke zhoršení mechanických vlastností, případně až k úplné ztrátě funkčních vlastností a destrukci konstrukce.



Obr. 3. Schéma rozvrstvení poruch v betonové konstrukci v důsledku rozvoje alkalicko-křemičité reakce. Převzato z Courtiera (1990).

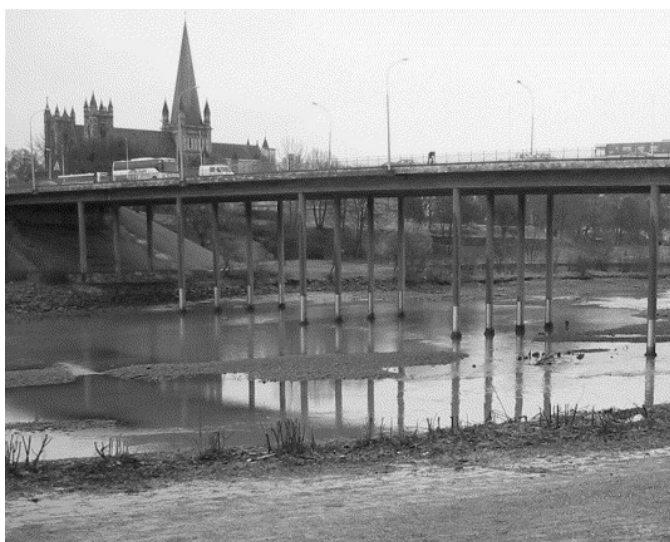
S ohledem na existenci různě reaktivních typů kameniva, z nichž některé vykáží rozvoj reakce velice rychle, zatímco jiné se značným zpožděním, lze projevům alkalicko-křemičité reakce předcházet zejména použitím nereaktivních typů kameniva. Avšak výběr nereaktivního kameniva závisí na metodice zkoušení reaktivnosti. V principu existují tři hlavní postupy: (1) detailní petrografický rozbor, (2) zrychlené zkoušky expanze modelových maltových směsí, nebo (3) stanovení reaktivity pomocí chemických zkoušek (Grattan-Bellew 2001). Posledně jmenovaný přístup je v poslední době považován za značně nepřesný a většinou je doporučováno ho nepoužívat. Praktické zkušebnictví se proto soustřeďuje zejména na zrychlené zkoušky modelových maltových směsí, které jsou vystaveny účinkům alkalického prostředí a zvýšené teploty, tedy podmínkám, které mají urychlit proces případné tvorby alkalicko-křemičitých gelů a expanze v řádu týdnů až prvních let (podrobněji k této skupině zkoušek např. Lindgård et al. 2012 a citace zde uvedené).

Detailní petrografický rozbor kameniva do betonu s cílem identifikovat potenciálně reaktivní složky je přístupem blízkým geologii, vyžaduje však značnou erudici nejen v oblasti petrografie a mikroskopie, ale též znalosti ohledně potenciální reaktivity různých typů horninotvorných minerálů, zejména pak SiO_2 fází. Na rozdíl od nízkého α křemene, který je považován za stabilní a nereaktivní, řada dalších forem SiO_2 (např. tridymit, cristobalit, chalcedon, opál, sopečné sklo) s hůře uspořádanou až amorfni strukturou jsou považovány za reaktivní (Diamond 1976). Avšak i nízký α křemen může být potenciálně reaktivní, zejména pokud vykazuje známky tektonického poškození v různých metamorfovaných horninách (Wigum 1995, Locati et al. 2010). Kromě SiO_2 fází jsou za reaktivní považovány i zeolity a jílové minerály (Beng 1992).

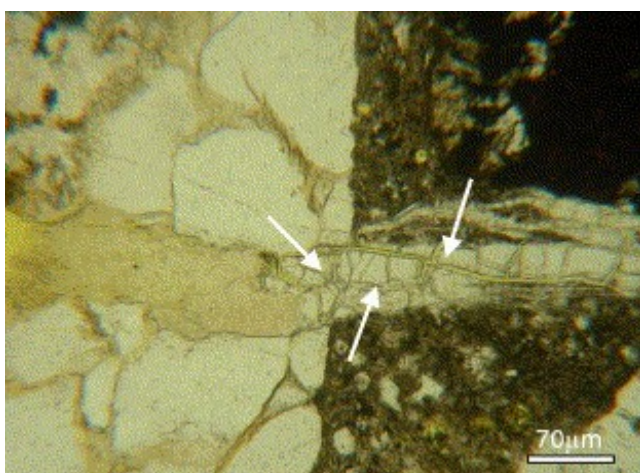
2.2.3.3. Alkalicko-křemičitá reakce v betonu mostních konstrukcí

Beton je nejvíce používaným materiálem při výstavbě dopravní infrastruktury, mimo jiné pro silniční či železniční mosty. Tyto konstrukce jsou, s ohledem na své umístění a zatížení, často postiženy alkalicko-křemičitou reakcí (West 1996). Příklady studia betonů mostních konstrukcí postižených alkalicko-křemičitou reakcí lze uvést z řady zemí celého světa (Ono 1988, Jensen a Danielsen 1992).

Jedním z názorných příkladů detailně studované mostní konstrukce s projevy alkalicko-křemičité reakce, je most Elgeseter v Trondheimu (Norsko), postavený v letech 1949-1951. Na výstavbu této subtilní (Obr. 4), 200 m dlouhé mostní konstrukce s jedinou dilatační spárou bylo použito kamenivo, jež pochází z pískovců, drob, kataklasticky postižených mylonitů, fylitů a velmi jemnozrnných rul (Jensen 2004). Souvislost mezi přítomností alkalicko-křemičitých gelů a použitými horninami byla prokázána i mikroskopickým studiem (Jensen 2004, Obr. 5). V podstatě všechny použité typy hornin jsou dnes považovány za náchylné či potenciálně náchylné k rozvoji alkalicko-křemičité reakce a v současné stavební praxi se jejich použití do betonu nedoporučuje.

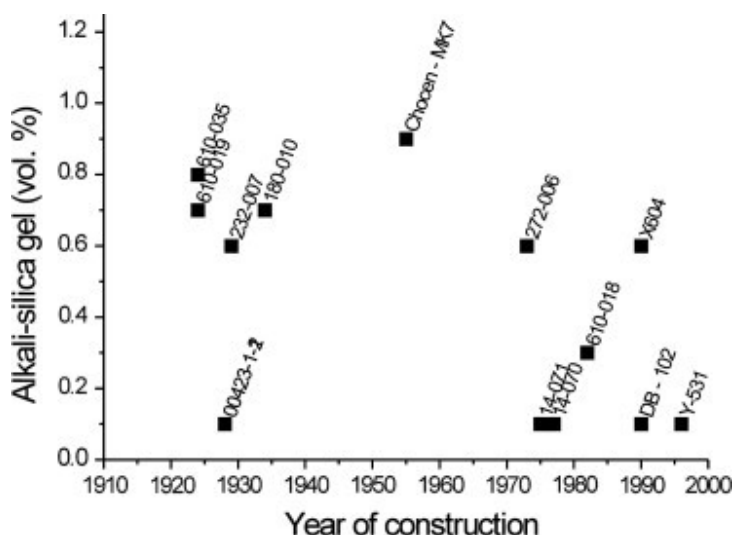


Obr. 4. Celkový pohled na most Elgeseter (Trondheim, Norsko). Převzato z Jensena (2004).

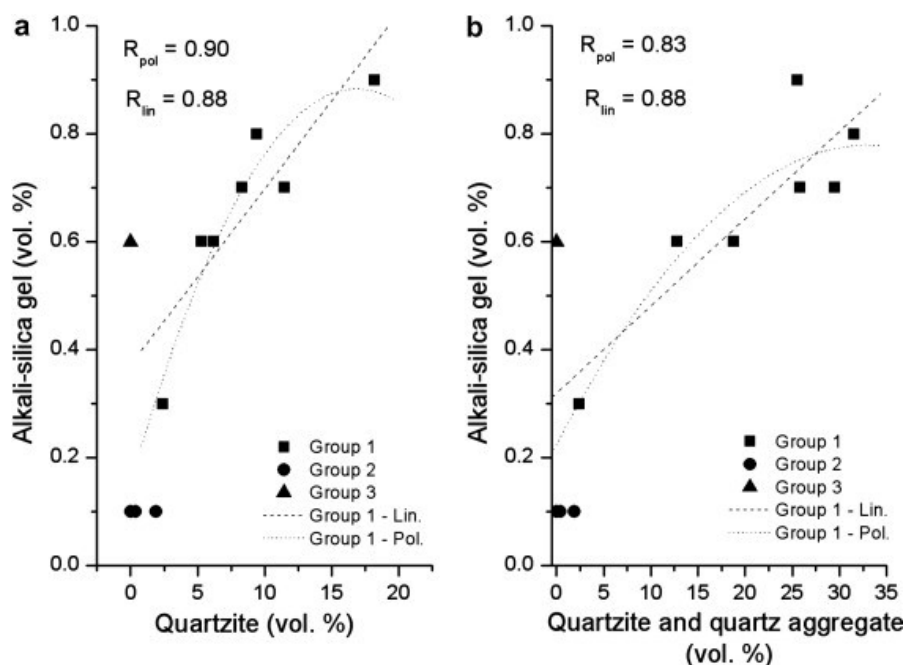


Obr. 5. Mikroskopický snímek vzorku betonu z most Elgeseter, dokumentující rozevřenou mikrotrhlinu protínající částici kameniva – pískovce (vlevo) a cementové pojivo (vpravo), vyplněnou alkalicko-křemičitým gelem (pozice vyznačena bílými šipkami). Převzato z Jensena (2004).

Dalším příkladem studia betonových mostních konstrukcí postižených alkalicko-křemičitou reakcí je skupina mostů z České republiky, studovaná v minulém desetiletí Lukschovou et al. (2009). Z výsledků této studie vyplývá, že betony mostů, vystavených v rozmezí 60 let, vykazují různý rozsah postižení alkalicko-křemičitou reakcí. Ten je závislý jak na stáří konstrukce (obecně se s rostoucím stářím množství alkalicko-křemičitého gelu zvyšuje, Obr. 6), tak na typu použitého kameniva. Mosty s nereaktivními typy kameniva (žuly, granitoidy, serpentinit, basaltoidy) vykázaly celkově menší rozsah postižení alkalicko-křemičitou reakcí, naopak mosty, u nichž bylo do betonu přidáno reaktivní kamenivo (kvarcity, metadroby, monominerální křemité klasty) obsahovaly výrazně větší množství gelu.



Obr. 6. Závislost mezi dobou výstavby mostu a množstvím alkalicko-křemičitého gelu v betonu. Převzato z Lukschové et al. (2009).



Obr. 7. Závislost mezi dobou výstavby mostu a množstvím alkalicko-křemičitého gelu v betonu. Převzato z Lukschové et al. (2009).

2.3. Síranové rozpínání

2.3.1. Obecně

Síranové rozpínání je jedním z mnoha chemických degradačních procesů postihujících betonové konstrukce. Síranové rozpínání je spojováno zejména s tvorbou fází ze skupiny ettringitu nebo thaumasitu, avšak může zahrnovat i další děje (Mehta 1992), ovšem s výjimkou fyzikálního účinku krystalizujících vodorozpustných solí (Haynes et al. 1996).

Nejběžnější formou porušení je reakce vápenatého aluminátu nebo hydroxidu se síranovými ionty za vzniku ettringitu, případně sádrovce (Diamond 1996). Pokud k těmto reakcím dochází v již vyzrálém betonu, projevují se zpravidla křehkým porušením a odprýskáváním částí betonových konstrukcí či jejich úplným rozpadem; tedy ztrátou funkčních požadovaných vlastností.

2.3.2. Síranové rozpínání za účasti ettringitu

2.3.2.1. Typy ettringitu v betonu

V případě síranového rozpínání za účasti ettringitu ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{--}32\text{H}_2\text{O}$) se hovoří o tzv. zpožděném vzniku ettringitu (angl. delayed ettringite formation, DEF) v již utuhlém, vyzrálém betonu (Collepardi 2003). Jedná se o proces, který je třeba odlišit od tzv. prvotního vzniku ettringitu (angl. early ettringite formation, EEF) během procesu tuhnutí ve stále ještě plastické hmotě betonu, kdy ke křehkému porušení hmoty betonu dojít nemůže (Collepardi 2003). Pro funkční vlastnosti betonu je tedy prvotní vznik ettringitu neškodný.

K prvotnímu vzniku ettringitu dochází během několika prvních hodin, zatímco zpožděná tvorba ettringitu se může projevit až po velice dlouhé době několika let či dokonce desetiletí (Collepardi 2003). Prvotní vznik ettringitu lze spojovat s jemně rozemletým sádrovcem (tj. regulátorem tuhnutí v cementu) či se síranovými přísadami do betonu s regulací smrštění při tuhnutí.

2.3.2.2. Zpožděný vznik ettringitu

Ke zpožděnému vzniku ettringitu dochází, na rozdíl od výše popsaného prvotního ettringitu, v nerovnoměrně lokalizovaných poruchách betonu, podél nichž beton odprýskává či se úplně rozpadá (Obr. 8).



Obr. 8. Příklad porušení betonového mostního pilíře trhlinami v důsledku rozvinuté zpožděné tvorby ettringitu (bez jakýchkoliv známek ASR). Pilíře byly vystavěny betonem, jehož pojivem je cement s vysokou počáteční pevností (ASTM typ III). Převzato z Thomase et al. (2008).

Zdroje látek pro vznik ettringitu může být jak v betonu samotném, tak mimo něj (Tab. 1). Vnější zdroj síranů je považován za tradiční pohled na mechanismus síranového rozpínání za účasti ettringitu (Collepari 2003, Whittaker a Black 2015). Aby k němu mohlo dojít, musí betonová konstrukce interagovat s půdami či vodou, obsahujícími sírany (zpravidla v roztoku), které jsou ve vodním prostředí přenášeny do propustné betonové konstrukce. Její propustnost je zajištěna vysokým podílem kapilárních, vzájemně propojených pórů.

Tab. 1. Charakteristika zpožděné tvorby ettringitu v závislosti na zdroji síranu (upraveno dle Collepariho 2003).

Vnější zdroj síranů	Vnitřní zdroj síranů
Sírany pocházející z vody či půdy	Sírany ze sádrovce, kameniva či z prvotního ettringitu
Propustný beton	Vznik podpořen mikrotrhlinami, v nichž krystalizuje ettringit
Vyskytuje se ve vlhkém prostředí podporujícím difúzi $(\text{SO}_4)^{2-}$ ve výplni kapilárních pórů	Vyskytuje se ve vlhkém prostředí podporujícím difúzi $(\text{SO}_4)^{2-}$ a dalších iontů (Ca^{2+} , aluminátové) ve vodou nasycených kapilárních pórech

V případě vnitřního zdroje síranů se problematika porušení betonu ettringitem objevuje ve vědecké literatuře až v 80. letech 20. stol. v souvislosti s betonovými výrobky (zejména pražci), jejichž zrání bylo urychlováno párou (Teponen a Ericksson 1987). Podle jedné teorie dochází k porušení betonu zpožděnou tvorbou ettringitu kvůli tepelnému rozkladu prvotního ettringitu (není stabilní při teplotách nad 70 °C) a jeho následné rekrystalizaci (např. Taylor et al. 2001). Proti této možnosti byly vzneseny výhrady z důvodu absence obdobných jevů v jiných betonových prvcích vyráběných stejnou technologií, či naopak přítomnosti stejných jevů porušení v betonových prvcích, které nebyly vystaveny působení vodní páry, resp. zvýšené teploty (Odler a Gasser 1988, Mielenz et al. 1995, Diamond 1996, Collepari 1999).

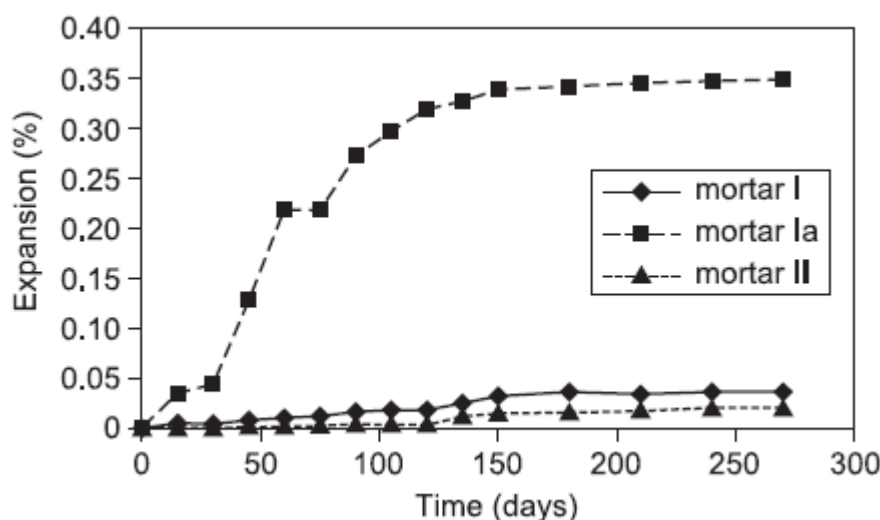
Alternativní, holistická teorie (Collepari 1999, 2003) zdůrazňuje úlohu jakýchkoliv ploch nespojitosti, zejména však mikrotrhlin (Fu et al. 1994, Fu a Beaudoin 1996a, Diamond 1996), opožděného vzniku ettringitu a přítomnost vody. Na vznik mikrotrhlin mají vliv teplotní dilatační cykly, zmrazovací cykly, lokalizované napětí, opakované dynamické namáhání konstrukce či předcházející rozvinutí alkalicko-křemičité reakce a s ní souvisejícího křehkého porušení (Collepari 2003). Opožděný vznik ettringitu lze spojit s uvolňováním síranového iontu z kameniva či s tepelným rozkladem prvotního ettringitu. Vyloučit nelze ani pomalé uvolňování síranových iontů, adsorbovaných na hydratovaných vápenatých křemičitanech v utuhlém betonu (Fu a Beaudoin 1996b).

2.3.2.3. Laboratorní ověřování náchylnosti k tvorbě ettringitu

Z ověřovacích laboratorních zkoušek, provedených v minulých desetiletích vyplývá, že zpožděný vznik ettringitu ovlivňuje celá řada faktorů. Výrazný vliv má typ použitého kameniva (Yang et al. 1999) a jeho zrnitost (Grattan-Bellew et al. 1998). Sníženou náchylnost k tvorbě ettringitu projevíly betonové směsi s karbonátovým kamenivem; přítomnost křemenného písku naopak náchylnost zvyšuje.

Mnoho zkoušek též potvrdilo výrazný vliv zvýšené teploty (temperování betonu vodní párou) na jeho rozpínání a zvýšenou možnost zpožděné tvorby ettringitu (např. Mielenz et al. 1995). Jak již bylo popsáno dříve, v tomto případě nelze vyloučit rozpouštění prvotního ettringitu a jeho následnou rekrystalizaci ettringitem druhotným se všemi doprovodnými negativními jevy.

Na vzniku ettringitu se bezpochyby účastní síra (SO_3) obsažené ve vlastním pojivu. Příkladem závislosti rozpínání v důsledku zpožděné tvorby ettringitu podle množství obsaženého SO_3 může být experimentální studie, provedené Owsiakem (2010) (Obr. 9).



Obr. 9. Příklad rozdílného rozpínání experimentálních vzorků malt s různými obsahy SO_3 – v případě vzorků označených jako mortar I a mortar II se jednalo o maltové směsi s velmi nízkým obsahem SO_3 (2,29, resp. 0,19 hm. %) pouze s přidavkem sádrovce (jako regulátoru tuhnutí) u vzorku mortar I, v případě vzorku Ia se jednalo o maltovou směs se zvýšeným obsahem SO_3 (3,76 hm. %), zajištěnou přidáním sádrovce a síranu draselného. Převzato z Owsiaka (2010).

2.3.3. Síranové rozpínání za účasti thaumasitu

2.3.3.1. Obecně

Tvorba thaumasitu v betonu patří vedle ettringitu k nejrozšířenějším formám síranového rozpínání. Aby se zamezilo síranovému rozpínání ettringitem, byly během 20. stol. vyvinuty typy cementu se sníženým obsahem aluminátové složky, které jsou odolné vůči tomuto degradačnímu jevu. Avšak tyto typy betonu nejsou imunní vůči vzniku thaumasitu, jenž vzniká reakcí hydratovaných vápenatých křemičitanů se síranovými ionty.

Síranové rozpínání betonu spojené s tvorbou thaumasitu bylo poprvé identifikováno v USA v polovině 60. let 20. stol. (Erlin a Stark 1966), v dalších desetiletích bylo popsáno z řady dalších zemí (např. Crammond 2003, Hobbs 2003, Hobbs a Taylor 2003, Loudon 2003, Thomas et al. 2003).

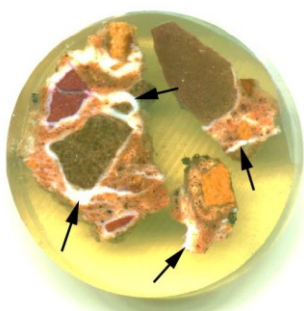
2.3.3.2. Podmínky vzniku

Podobně jako u jiných chemických degradačních procesů betonu, i síranové rozpínání s tvorbou thaumasitu vyžaduje určité nezbytné podmínky. Těmi jsou zejména specíe, jež se podílejí na vzniku vlastní fáze o chemickém složení $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{SO}_4)(\text{CO}_3)(\text{OH})_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$.

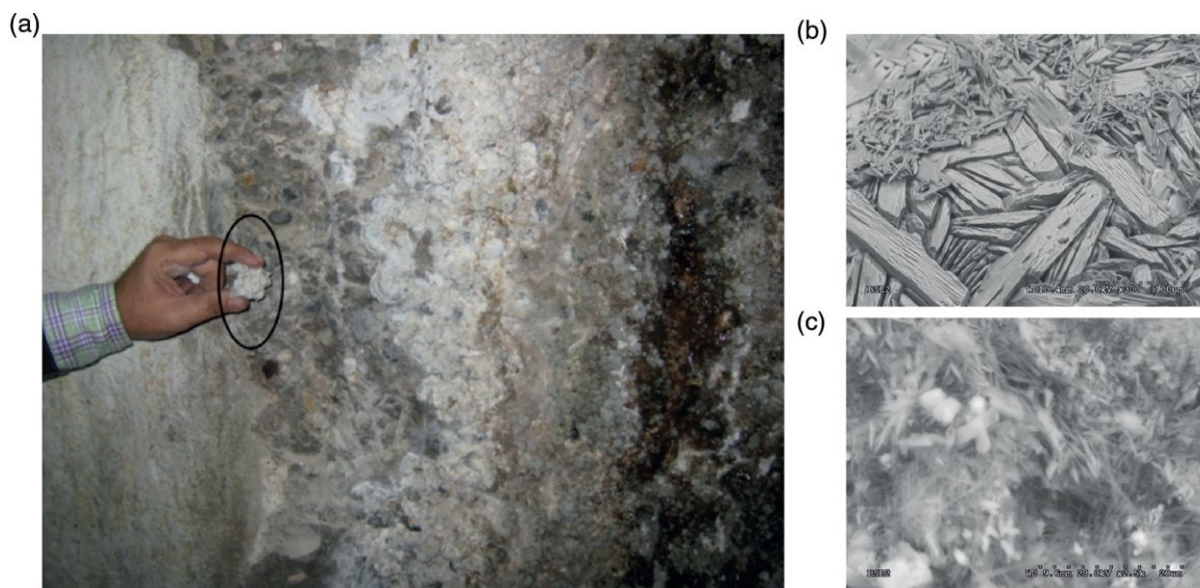
V první řadě je zapotřebí zdroj síranových iontů, které mohou být obsaženy v podzemní vodě, v půdách apod. (Crammond 2003). Síranové ionty mohou též pocházet z oxidovaných sulfidických fází v horninách. Dále je zapotřebí $(\text{SiO}_3)^{2-}$ ion. Ten je nezbytnou součástí všech typů cementu, v nichž převládají vápenaté křemičitanové (allit, belit). Pro tvorbu thaumasitu je též nutný uhličitanový $(\text{CO}_3)^{2-}$ ion. Jeho zdroje mohou být velice pestré: od vlastního cementového pojiva, přes karbonátové horniny

použité jako plnivo do betonu až po uhličitánové ionty obsažené ve vodě, která proniká do betonu. Rychlou tvorbu thaumasitu spojenou s vlivem mořské vody na betonovou konstrukci popisují např. Sibbick et al. (2003).

Podobně jako všechny formy síranového rozpínání, i tvorba thaumasitu vyžaduje přítomnost vody (Obr. 10-11). Thaumasit přednostně vzniká za nižších teplot (pod 15 °C, optimálně kolem 5 °C), při teplotách vyšších (do 25°C) je rychlost jeho tvorby výrazně pomalejší (van Aardt a Visser 1975, Bensted 1988).



Obr. 10. Příklad thaumasitu v nábrusu 40 mm v průměru zhotoveném z poškozeného cemento-betonového krytu dálnice v Anglii. Thaumasit tvoří bílé lemy (pozice vyznačeny šipkami) kolem částic hrubého kameniva (vápence).



Obr. 11. Stěna tunelu přehrady Mequinenza (Španělsko) (snímek (a)), jejíž beton (s použitím vápence jako hrubého kameniva) je silně degradován sírany s draslíkem a vápníkem (mikroskopický snímek ze SEM (b) a směsí sádrovce, kalcitu a thaumasitu (snímek (c))). Vznik thaumasitu byl podpořen rozpadem okolních hornin, obsahujících vložky lignitu s vysokým podílem sulfidů. Převzato z Chinchón-Payá et al. (2015).

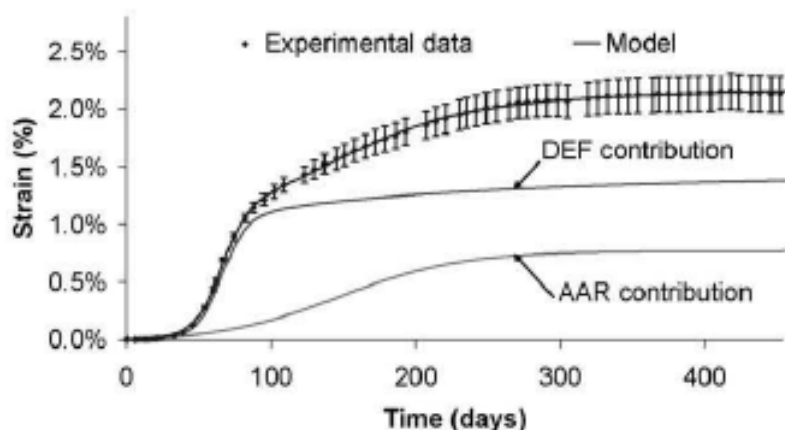
2.4. Souběh alkalického a síranového rozpínání

Některé práce, věnující se výzkumu betonových stavebních konstrukcí se známkami degradace v důsledku chemických reakcí, prokázaly přítomnost obou výše zmiňovaných skupin reakcí – tj. tvorbu alkalicko-křemičitých gelů i síranového rozpínání (Johansen et al. 1993, Shayan a Quick 1992, Thomas et al. 2008). Vztah obou typů reakcí je předmětem diskusí (Bauer et al. 2006). Makroskopické projevy obou reakcí jsou si velmi podobné, proto bývá velmi obtížné rozhodnout, který z jevů nastal dříve (Ekolu et al. 2007a). Diagnostický průzkum na místě proto musí být doplněn o podrobný mikroskopický výzkum či laboratorní zkoušky (Marusin 2004, Thomas et al. 2008).

Avšak ani výsledky těchto zkoušek nemusí přinést jednoznačné řešení problému, což dokazuje protikladný výklad důvodu porušení finských železničních pražců, jež podle jedné studie byly porušeny vlivem alkalického rozpínání kameniva (Shayan a Quick 1994), zatímco výsledky jiné studie (Tepponen a Ericksson 1997) poukázaly na síranové rozpínání. Situace je o to komplikovanější, že se oba typy reakcí doplňují, resp. při souběžném výskytu dochází k násobení jejich destruktivního účinku (Pettifer a Nixon 1980, Brown a Bothe 1993, Shayan a Ivanusec 1996, Ekolu et al. 2007b).

V některých případech je za prvotní příčinu vzniku poruch považován rozvoj alkalicko-křemičité reakce, zatímco tvorba druhotných síranů by měla pouze využívat otevřené mikrotrhliny (Diamond a Ong 1994, Shayan a Ivanusec 1996), vzniklé přechodí reakcí. Chemické změny, vyvolané alkalicko-křemičitou reakcí, podle některých autorů podporují vznik ettringitu (Brown a Bothe 1993), který naopak zvyšuje míru expanze (Owsiak 2010). Proti tomuto názoru však lze argumentovat tím, že tvorba ettringitu zvyšuje alkalinitu pórových roztoků a tím vlastně usnadňuje tvorbu alkalicko-křemičitých gelů (Pettifer a Nixon 1980).

Ověřovací laboratorní studie (Martin et al. 2010), zaměřená na řešení otázky časového sledu obou typů reakcí pomocí měření časového vývoje deformací, přinesla zajímavé zjištění o prvotním příspěvku zpožděné tvorby ettringitu, a teprve následném působení alkalicko-křemičité reakce (Obr. 12). S ohledem na skutečnost, že experimentální měření proběhlo pouze na dvou litologických typech (nereaktivní hornině s křemičitany a reaktivním vápenci), bude nutné univerzálnost tohoto pozorování ověřit s dalšími typy hornin.



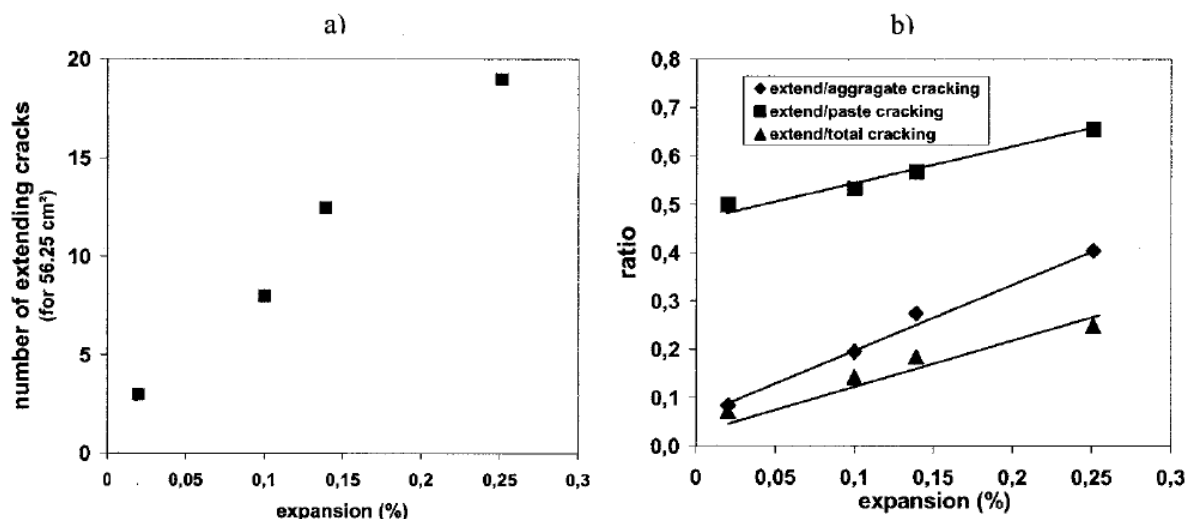
Obr. 12. Výsledky modelování s využitím laboratorních experimentálních dat, které ukazují na možný prvotní rozpínání z důvodu tvorby zpožděného ettringitu a navazujícího rozvoje alkalicko-křemičité reakce. Převzato z Martina et al. (2010).

3. MOŽNOSTI MIKROSKOPICKÉHO VÝZKUMU BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ POSTIŽENÝCH CHEMICKÝMI REAKCEMI

3.1. Základní přístupy

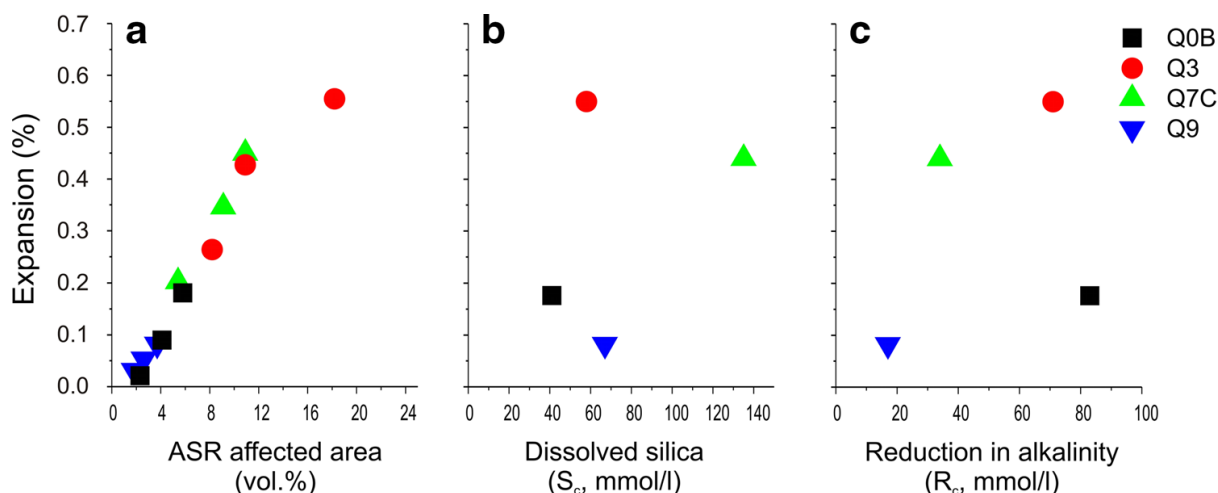
Základním a zároveň nejvhodnějším nástrojem zkoumání betonu stavebních konstrukcí, postižených alkalicke-křemičitou reakcí, je aplikace standardních petrografických metod (French 1991, St John et al. 1998, Poole a Sims 2016), zejména mikroskopický výzkum výbrusů či nábrusů. Jejich zkoumání v optickém mikroskopu či pomocí elektronové mikroskopie s mikroanalýzou (SEM/EDS) je nezbytné nejen pro zjištění přítomných projevů degradačních chemických reakcí (přítomnost produktů těchto reakcí, jejich chemické složení, vazba k mikrostruktuře betonu), ale též pro stanovení rozsahu jevů (Knudsen a Thaulow 1975, Rivard et al. 2002).

K dosažení těchto cílů slouží různé přístupy: od jednoduchých, využívajících hodnotící škály (např. Blight et al. 1981), až po pokročilé aplikace s pomocí počítačové analýzy obrazu získaných mikroskopických snímků (Šachlová et al. 2017), jejichž výsledky lze dobře korelovat s experimentálně zjištěným rozpínáním (Obr. 13).



Obr. 13. Příklad závislosti mezi mírou rozpínání a četností poruch, zjištěných kvantitativním pozorováním pomocí elektronové mikroskopie. Převzato z Rivarda et al. (2002).

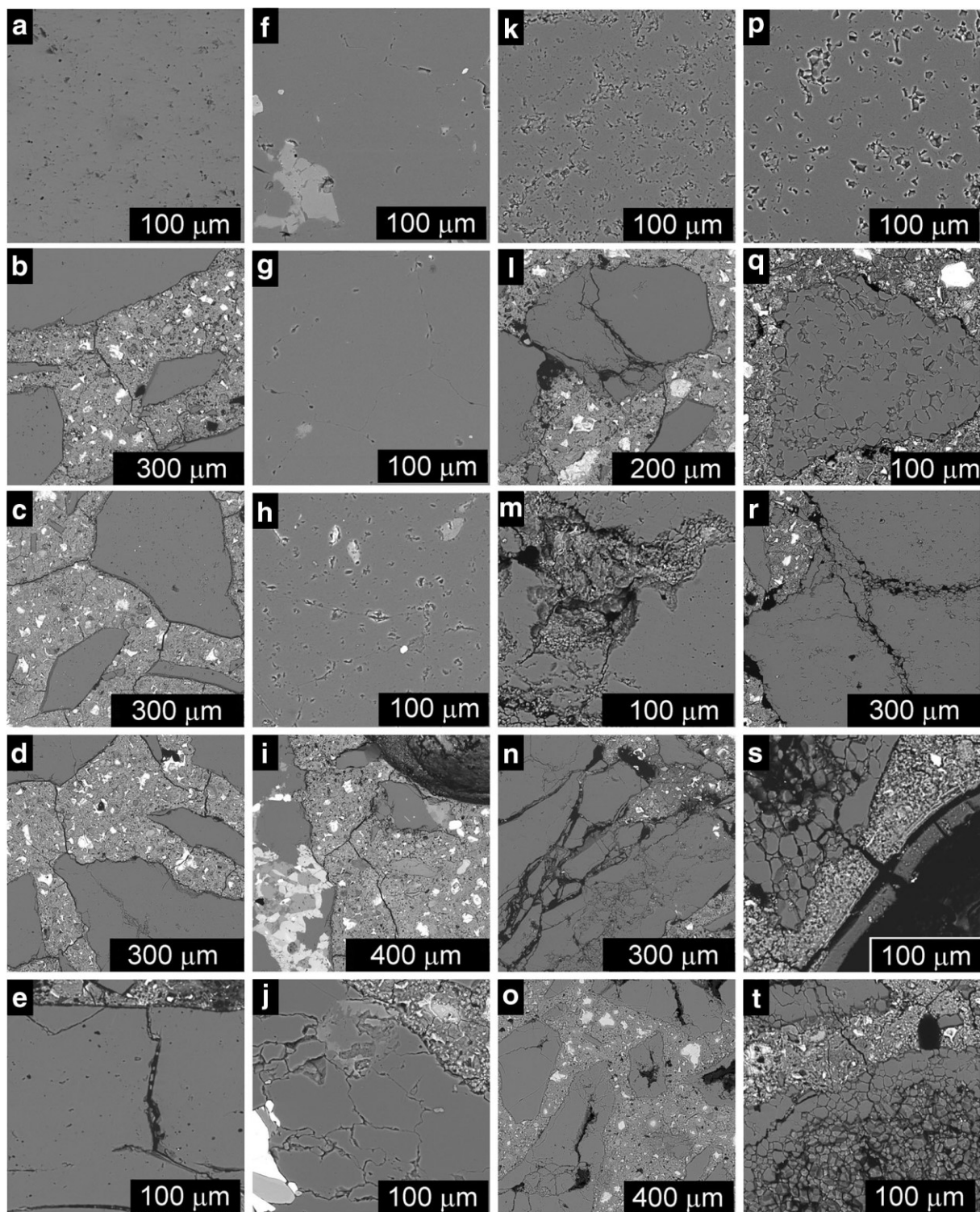
Pro rozeznání reaktivních částic v kamenivu se v různých experimentálních studiích využívá kontrastu v rychlosti rozpouštění minerálních zrn, obnažených na nábrusech a vystavených působení alkalicckých roztoků. Kombinací mikroskopických pozorování pomocí SEM/EDS a počítačové analýzy obrazu lze nejen identifikovat reaktivní zrna (Leemann a Holzer 2005), ale též porovnat vliv jejich četnosti na míru rozpínání (např. Šachlová et al. 2017). Výsledky poslední jmenované studie prokázaly vysokou míru korelace mezi mírou rozpínání experimentálních maltových těles a plošným rozsahem částic kameniva (Obr. 14a), vykazujících rozpouštění v důsledku probíhající alkalicke-křemičité reakce (Obr. 15); naopak závislost mezi mírou rozpínání a dvěma základními parametry rychlé chemické zkoušky pro zjištění potenciální reaktivity kameniva (podrobnosti o této zkoušce viz např. Grattan-Bellew 2001) byla velice nízká (Obr. 14b,c).



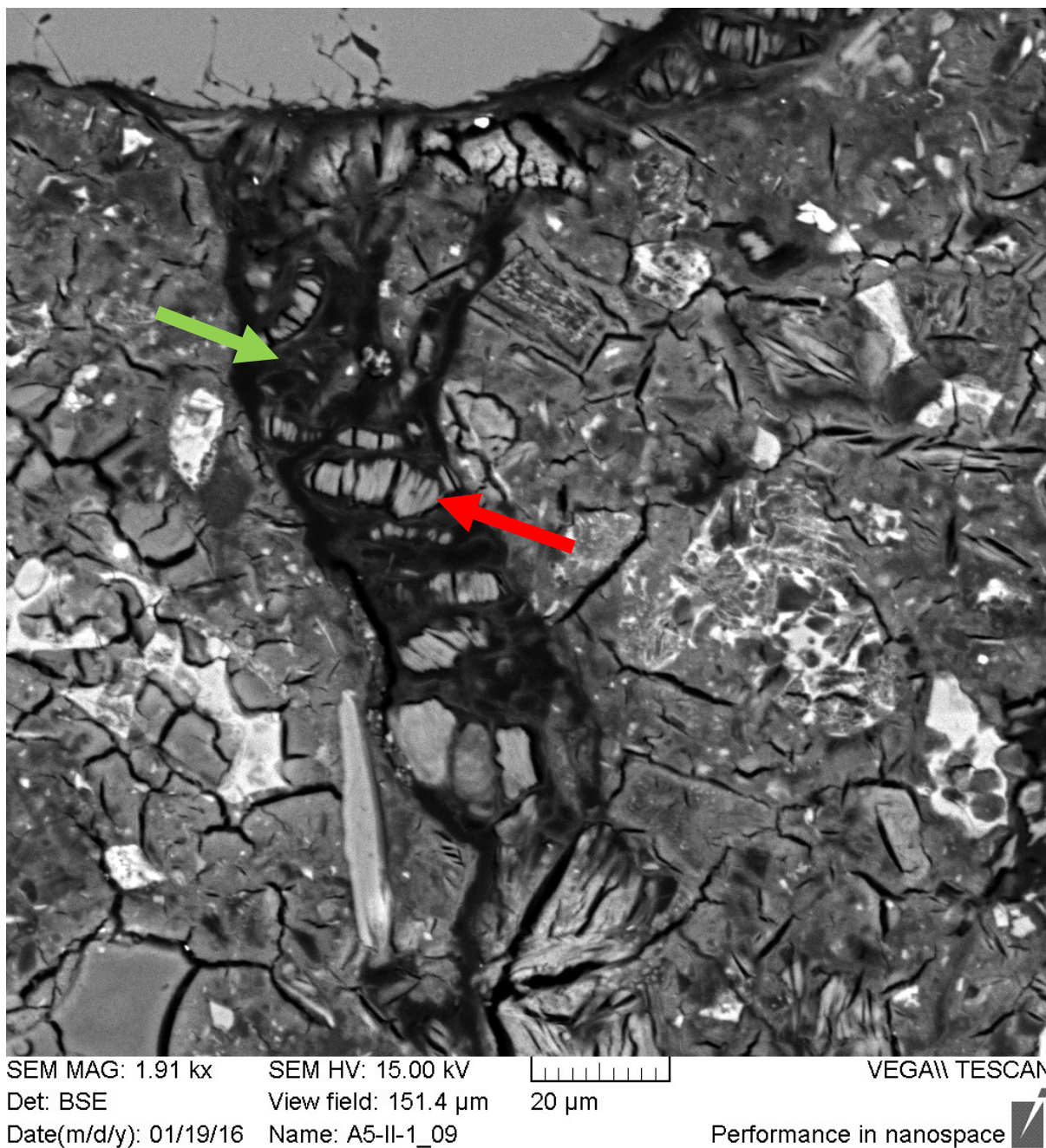
Obr. 14. Příklad zjištěné závislosti mezi plošným rozsahem částic kameniva, vykazujících známky rozpouštění v důsledku alkalicko-křemičité reakce a mírou rozpínání (a), a srovnání nízké míry korelace mezi rozpínáním těch samých vzorků a výsledky zrychlené chemické zkoušky (b, c). Převzato ze Šachlové et al. (2017).

3.2. Příklad výsledků mikroskopického studia mostní betonové konstrukce v České republice

Betonové mostní konstrukce a jejich poškození degradačními chemickými reakcemi začalo být studováno v České republice před více než deseti lety Šachlovou (roz. Lukschovou) a spolupracovníky (výsledky viz např. Lukschová et al. 2009). Na tyto prvotní práce navázalo v posledních letech studium dalších mostních konstrukcí, z nichž k nejzajímavějším patří Žďákovský most přes Vltavu. Přestože se jedná o ocelový obloukový most, podpůrné kotvící konstrukce jsou betonové. Při celkové rekonstrukci mostu v uplynulých letech (tedy téměř 50 let po uvedení do provozu v roce 1967 – viz Kleinová 2006) byly pracovníky Klocknerova ústavu odebrány vývrty z betonových podpůrných konstrukcí, jež byly následně studovány Příkrylem (2016) za účelem zjištění možných projevů alkalicko-křemičité reakce. Při detailním mikroskopickém studiu byly identifikovány nejen četné projevy alkalicko-křemičité reakce (bezpochyby zapříčiněné použitím reaktivních forem kameniva), ale též rozsáhlé známky síranového rozpínání. Na řadě vzorků bylo možné pozorovat souběh projevů alkalicko-křemičité reakce a síranového rozpínání. Na části vzorků bylo poměrně dobře patrné (viz např. obr. 16), že tvorba ettringitu a s ním spojené křehké porušení mikrostruktury betonu tahovými trhlinami předcházelo tvorbě ettringitu. Z těchto mikroskopických pozorování lze tedy usuzovat, že alespoň u některých typů betonových konstrukcí je síranové rozpínání prvotní příčinou vzniku poruch, což je v souladu s nověji navrženou hypotézou Martina et al. (2010).



Obr. 15. Příklad výsledků studia experimentálních maltových směsí s různě reaktivním kamenivem (zleva doprava reaktivita kameniva roste – a-e = křemen z pegmatitu, f-j = kvarcit, k-o = metadroba, p-t = rohovec) zjištěné pomocí elektronové mikroskopie. První řada snímků dokumentuje stav před vznikem reakce, druhá řada stav po jednom dni působení alkalických roztoků, třetí řada stav po 5 dnech, čtvrtá řada stav po 9 dnech a poslední, pátá řada stav po 14 dnech působení alkalických roztoků. Převzato ze Šachlové et al. (2017).



Obr. 16. Detail mikrostruktury betonu z podpůrné konstrukce Žďákovského mostu (vývrt A5, výbrus A5-II-1) výrazně porušené tahovou mikrotrhlinou, kterou téměř bezzbytku vyplňuje ettringit (vyznačen červenou šipkou) a alkalicko-křemičitý gel (vyznačen zelenou šipkou). Z tohoto snímku lze usuzovat na to, že ettringit se vytvořil před alkalicko-křemičitým gelem; síranové rozpínání pakl lze považovat za prvotní příčinu křehkého tahového porušení mikrostruktury betonu. Převzato z Příkryla (2016).

4. ZÁVĚR

Degradační chemické reakce, postihující vyzrálý beton ve stavebních konstrukcích, si vynucují zvýšené náklady na předčasnou údržbu a představují vážné ohrožení jejich životnosti; v řadě případů mají vliv také na bezpečné užívání těchto konstrukcí (např. mosty, přehrady, jaderné elektrárny apod.). K nejrozšířenějším typům těchto reakcí patří tvorba alkalicko-křemičitých gelů s následným rozpínáním při styku s vlhkostí a síranové rozpínání.

Oba typy reakcí jsou intensivně studovány řadu desetiletí, přesto však zůstává řada nevyřešených nebo nevyjasněných problémů. Mezi ně patří, mimo jiné, otázka společného výskytu obou typů reakcí v betonu a souslednost jejich rozvoje. Dosud provedené práce přinášejí nejednoznačné až rozporuplné závěry, kdy podle jedné skupiny autorů nejprve nastává reakce alkalicko-křemičitá, zatímco podle jiných studií se zdá pravděpodobnější primární vznik poškození betonu v důsledku zpožděné tvorby ettringitu a teprve na něj navazující rozvoj alkalicko-křemičité reakce. Tyto rozpory mohou vznikat v důsledku aplikace metodicky rozdílných přístupů řešení problému (tj. zejména mikroskopická pozorování vs. laboratorní experimenty využívající měření rozpínání a následné modelování rozvoje dílčích typů rozpínání).

Třebaže výzkum degradačních chemických reakcí v České republice doznal v posledních dvou desetiletích značného pokroku a částečně dohnal výrazné zpoždění oproti jiným zemím, většina prací se soustředila buď na aplikovaný výzkum zasažených betonových konstrukcí, a to zejména na identifikaci alkalicko-křemičité reakce, nebo se jednalo o experimentální výzkum možností hodnocení různě reaktivních typů kameniva z pohledu alkalicko-křemičité reaktivity. Naproti tomu studiu souběžnosti alkalicko-křemičitého a síranového rozpínání byla v domácích studiích dosud věnována jen velmi malá pozornost. Poznatky několika posledních mikroskopických výzkumů ukazují, že bude nutné se na tuto problematiku více zaměřit jak z pohledu výběru analytických metod, tak případných laboratorních zkoušek.

5. LITERATURA

- Aïtcin P.C., 2000. Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research* 30(9): 1349–1359.
- Al Shamaa M., Lavaud S., Divet L., Nahas G., Torrenti J.M., 2014. Coupling between mechanical and transfer properties and expansion due to DEF in a concrete of a nuclear power plant. *Nuclear Engineering and Design* 266: 70–77.
- Alderman A.R., Gaskin A.J., Jones S. H., Vivian H.E., 1947. Australian aggregates and cements. In: *Studies in Cement-Aggregate Reaction*. Bulletin No. 229, Council for Scientific and Industrial Research, Melbourne, Australia, str. 1-46.
- Anonym, 2013. *World Construction Aggregates. Industry Study with Forecasts for 2017 & 2022*. Study 3078. The Freedonia Group, Cleveland.
- Bauer S., Cornell B., Figurski D., Ley T., Miralles J., Folliard K., 2006. *Alkali-silica reaction and delayed ettringite formation in concrete: A literature review*. National Technical Information Service, Springfield, 74 str.
- Beng Y.E., 1992. The mineralogical and petrological factors in Alkali Silica Reactions in concrete. *Geological Society of Malaysia, Bulletin* 31: 1–20.
- Bensted J., 1988. Thaumasite—a deterioration product of hardened cement structures. *Il Cemento* 85(1): 3–10.
- Bouzabata H., Multon S., Sellier A., Houari H., 2012. Swellings due to alkali-silica reaction and delayed ettringite formation: Characterisation of expansion isotropy and effect of moisture conditions. *Cement and Concrete Composites* 34(3): 349–356.
- Brown P.W., Bothe J.V., 1993. The stability of ettringite. *Advances in Cement Research* 5(18): 47-63.
- Brown P.W., Doerr A., 2000. Chemical changes in concrete due to the ingress of aggressive species. *Cement and Concrete Research* 30(3): 411–418.
- Choquette M., Bérubé M.A., Locat J., 1991. Behavior of common rock-forming minerals in a strongly basic NaOH solution. *Canadian Mineralogist* 29: 163–173.
- Collepardi M., 1999. Damage by delayed ettringite formation. *Concrete International* 21(1): 69–74.
- Collepardi M., 2003. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. *Cement and Concrete Composites* 25(4): 401–407.
- Courtier R.H., 1990. The assessment of ASR-affected structures. *Cement and Concrete Composites* 12(3): 191–201.
- Crammond N.J., 2003. The thaumasite form of sulfate attack in the UK. *Cement & Concrete Composites* 25(8): 809–818.
- Diamond S., 1976. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms 2. Reactive aggregates. *Cement and Concrete Research* 6(4): 549–560.
- Diamond S., 1996. Delayed Ettringite Formation—Processes and Problems. *Cement and Concrete Composites* 18(3): 205–215.
- Diamond S., 1997. Alkali-silica reactions—some paradoxes. *Cement and Concrete Composites* 19(5-6): 391–401.

- Diamond S., Thaulow N., 1974. A study of expansion due to alkali—silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate. *Cement and Concrete Research* 4(4): 591–607.
- Diamond S., Ong S., 1994. Combined effects of alkali silica reaction and secondary ettringite deposition in steam cured mortars. In: Gartner E.M., Uchikawa H. (eds.) *Cement Technology*. Ceramic Transactions Vol. 40, American Ceramic Society, Westerville, Ohio, str. 79–90.
- Ekolu S.O., Thomas M.D.A., Hooton R.D., 2007a. Dual effectiveness of lithium salt in controlling both delayed ettringite formation and ASR in concretes. *Cement and Concrete Research* 37(6): 942–947.
- Ekolu S.O., Thomas M.D.A., Hooton R.D., 2007b. Implications of pre-formed microcracking in relation to the theories of DEF mechanism. *Cement and Concrete Research* 37(2): 161–165.
- Erlin B., Stark D.C. 1966. Identification and occurrence of thaumasite in concrete a discussion for the 1965 HRB symposium on aggressive fluids. *Highway Research Record* 113: 108–113.
- Fournier B., Bérubé M-A., 2000. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering* 27(2): 167–191.
- French W.J., 1991. Concrete petrography: a review. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 24(1): 17–48.
- Fu Y., Beaudoin J.J., 1996a. Microcracking as a precursor to delayed ettringite formation in cement systems. *Cement and Concrete Research* 26(10): 1493–1498.
- Fu Y., Beaudoin J.J., 1996b. Mechanism of delayed ettringite formation in Portland cement system. *ACI Materials Journal* 93(4): 327–333.
- Fu Y., Xie P., Gu P., Beaudoin J.J., 1994. Significance of pre-existing cracks on nucleation of secondary ettringite in steam cured cement paste. *Cement and Concrete Research* 24(6): 1015–1024.
- Garcia-Diaz E., Riche J., Bulteel D., Vernet C., 2006. Mechanism of damage for the alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research* 36(2): 395–400.
- Gillott J.E., 1964. Mechanism and kinetics of expansion in the alkali-carbonate rock reaction. *Canadian Journal of Earth Sciences* 1(2): 121–145.
- Gillott J.E., Swenson E.G., 1969. Mechanism of the alkali-carbonate rock reaction. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 2(1): 7–23.
- GjØrv O.E., 2003. Durability design and construction quality of concrete structures. In: Yuan Y.-s., Shah S.P., Lü H.-l. (eds.) *Advances in Concrete and Structures*. Proceedings of the International Conference on Advances in Concrete and Structures ICACS 2003, RILEM Publications, Vol. 1, str. 309–320.
- Glasser F.P., Marchand J., Samson E., 2008. Durability of concrete—degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. *Cement and Concrete Research* 38(2): 226–246.
- Grattan-Bellew P.E., 2001. Petrographic and technological methods for evaluation of concrete aggregates. In: Ramachandran V.S., Beaudoin J.J. (eds.) *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology. Principles, Techniques, and Applications*. Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, USA, str. 63–98.
- Grattan-Bellew P.E., Beaudoin J.J., Vallée V.-G., 1998. Effect of aggregate particle size and composition on expansion of mortar bars due to delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research* 28(8): 1147–1156.

- Grattan-Bellew P.E., Mitchell L.D., Margeson J., Min D., 2010. Is alkali-carbonate reaction just a variant of alkali-silica reaction ACR=ASR? *Cement and Concrete Research* 40(2): 556–562.
- Hadley D.W., 1961. Alkali reactivity of carbonate rocks—expansion and dedolomitization. *Highway Research Board Proceedings* 40: 462–474.
- Haha M.B., Gallucci E., Guidoum A., Scrivener K.L., 2007. Relation of expansion due to alkali-silica reaction to the degree of reaction measured by SEM image analysis. *Cement and Concrete Research* 37(8): 1206–1214.
- Haynes H., O’Neil R., Mehta P.K., 1996. Concrete deterioration from physical attack by salts. *Concrete International* 18(1): 63–68.
- Hobbs D.W., 2003. Thaumate sulfate attack in field and laboratory concretes: implications for specifications. *Cement and Concrete Composites* 25(8): 1195–1202.
- Hobbs D.W., Taylor M.G., 2000. Nature of the thaumasite sulfate attack mechanism in field concrete. *Cement and Concrete Research* 30(4): 529–533.
- Hou X., Struble L.J., Kirkpatrick R.J., 2004. Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and portlandite. *Cement and Concrete Research* 34(9): 1683–1696.
- Chinchón-Payá S., Aguado A., Nugterenc H.W., Chinchón S., 2015. External sulfate attack in dam concretes with thaumasite formation. *Materiales de Construcción* 65(317): e042, 9 str.
- Ichikawa T., 2009. Alkali-silica reaction, pessimum effects and pozzolanic effect. *Cement and Concrete Research* 39(8): 716–726.
- Ichikawa T., Miura M., 2007. Modified model of alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research* 37(9): 1291–1297.
- Jensen V., 2004. Alkali-silica reaction damage to Elgeseter Bridge, Trondheim, Norway: a review of construction, research and repair up to 2003. *Materials Characterization* 53(2): 155–170.
- Jensen V., Danielsen S.W., 1992. Alkali-aggregate reaction in Southern Norway. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, July 27-31, 1992, London*. The Concrete Society, Wexham, Vol. 1, str. 477–484.
- Johansen V., Thaulow N., Skalny J., 1993. Simultaneous presence of alkali-silica gel and ettringite in concrete. *Advances in Cement Research* 5(17): 23–29.
- John V.M., 2003. On the sustainability of concrete. *Industry and Environment* 26(2): 62–63.
- Jones A.E.K., Clark L.A., 1998. The effects of ASR on the properties of concrete and the implications for assessment. *Engineering Structures* 20(9): 785–791.
- Katayama T., 2010. The so-called alkali-carbonate reaction (ACR)—Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR. *Cement and Concrete Research* 40(4): 643–675.
- Kleinová J., 2006. Významné ocelové obloukové mosty na českém území v souvislosti se světovým vývojem mostního stavitelství. *Rozpravy Národního technického muzea v Praze, sv. 200, řada Dějiny vědy a techniky* 14: 5–10.
- Knudsen T., Thaulow N., 1975. Quantitative microanalyses of alkali-silica gel in concrete. *Cement and Concrete Research* 5(5): 443–454.
- Kuzel H.J., 1996. Initial hydration reactions and mechanisms of delayed ettringite formation in Portland cements. *Cement and Concrete Composites* 18(3): 195–203.

- Leemann A., Holzer L., 2005. Alkali-aggregate reaction—identifying reactive silicates in complex aggregates by ESEM observation of dissolution features. *Cement and Concrete Composites* 27(7): 796–801.
- Lindgård J., Andiç-Çakır Ö., Fernandes I., Rønning T.F., Thomas M.D., 2012. Alkali–silica reactions (ASR): literature review on parameters influencing laboratory performance testing. *Cement and Concrete Research* 42(2): 223–243.
- Locati F., Marfil S., Baldo E., 2010. Effect of ductile deformation of quartz-bearing rocks on the alkali-silica reaction. *Engineering Geology* 116(1): 117–128.
- López-Buendía A.M., Climent V., Verdú P., 2006. Lithological influence of aggregate in the alkali-carbonate reaction. *Cement and Concrete Research* 36(8): 1490–1500.
- Lorenz W., Gwosdz W., 2003. Manual on the geological-technical assessment of mineral construction materials. *Geologisches Jahrbuch, Sonderhefte Reihe H*, Heft SH 15, 1–498.
- Loudon N., 2003. A review of the experience of thaumasite sulfate attack by the UK Highways Agency. *Cement and Concrete Composites* 25(8): 1051–1058.
- Lukschová Š., Příkryl R., Pertold Z., 2009. Petrographic identification of alkali-silica reactive aggregates in concrete from 20th century bridges. *Construction and Building Materials* 23(2): 734–741.
- Marchand J., Odler I., Skalny J.P., 2002. *Sulfate attack on concrete*. Spon Press, London.
- Martin R.P., Renaud J.C., Toutlemonde F., 2010. Experimental investigations concerning combined delayed ettringite formation and alkali aggregate reaction. In: Castro-Borges P. (ed.) *Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading*. Proceedings of the 6th International Conference on Concrete under Severe Conditions (CONSEC'10), Merida, Yucatan, Mexico, 7-9 June 2010, CRC Press, A.A.Balkema, Leiden, str. 287–295.
- Marusin S.L., 1994. A simple treatment to distinguish alkali-silica gel from delayed ettringite formations in concrete. *Magazine of Concrete Research* 46(168): 163–166.
- McNally G.H., 1998. *Soil and Rock Construction Materials*. E & FN Spon, London.
- Mehta P.K., 1992. Sulfate attack on concrete—a critical review. In: Skalny S.J., Skalny J. (eds) *Materials science of concrete III*. American Ceramic Society, Westerville, OH, str. 105–130.
- Mielenz R.C., Marusin S.L., Hime W.G., Jugovic Z.T., 1995. Investigation of prestressed concrete railway tie distress. *Concrete International* 17(12): 62–68.
- Min D., Mingshu T., 1993. Mechanism of dedolomitization and expansion of dolomitic rocks. *Cement and Concrete Research* 23(6): 1397–1408.
- Naik T.R., 2008. Sustainability of concrete construction. *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 13(2): 98–103.
- Nguyen V-H., Leklou N., Aubert J-E., Mounanga P., 2013. The effect of natural pozzolan on delayed ettringite formation of the heat-cured mortars. *Construction and Building Materials* 48: 479–484.
- Odler I., Gasser M., 1988. Mechanism of sulfate expansion in hydrated Portland cement. *Journal of the American Ceramic Society* 71(11): 1015–1020.
- Ono K., 1988. Damaged concrete structures in Japan due to alkali silica reaction. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 10(4): 247–257.

- Owsiak Z., 2010. Effect of delayed ettringite formation and alkali-silica reaction on concrete microstructure. *Ceramics-Silikáty* 54(3): 277–283.
- Pavoine A., Brunetaud X., Divet L., 2012. The impact of cement parameters on Delayed Ettringite Formation. *Cement and Concrete Composites* 34(4): 521–528.
- Pettifer K., Nixon P.J., 1980. Alkali-metal sulphate—factor common to both alkali aggregate and sulphate attack on concrete. *Cement and Concrete Research* 10(2): 173–181.
- Poole A.B., Sims I., eds., 2016. *Concrete petrography: a handbook of investigative techniques*. CRC Press.
- Prentice J.E., 1990. *Geology of construction materials*. Chapman and Hall, London.
- Prezzi M., Monteiro P.J.M., Sposito G, 1997. The Alkali-silica reaction, part I: Use of the double-layer theory to explain the behaviour of reaction-product gels. *ACI Materials Journal* 94(1): 10–16.
- Prezzi M., Monteiro P.J.M., Sposito G, 1998. Alkali-silica reaction – part 2: The effect of chemical admixtures. *ACI Materials Journal* 95(1): 3–10.
- Přikryl R., 2016. Materiálový průzkum vzorků betonu, Žďákovský most, vývrty A1-A5. Nepublikovaná zpráva pro Kloknerův ústav, 157 str.
- Přikryl R., 2017. Constructional geomaterials: versatile Earth resources in the service of humankind—introduction to the thematic set of papers on: challenges to supply and quality of geomaterials used in construction. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 76(1): 1–9.
- Přikryl R., Török Á., Gómez-Heras M., Miskovsky K., Theodoridou M., 2016. Geomaterials in construction and their sustainability: understanding their role in modern society. In: Přikryl R., Török Á., Gómez-Heras M., Miskovsky K., Theodoridou M. (eds.) *Sustainable use of traditional geomaterials in construction practice*. Geological Society, London, Special Publications, 416, str. 1–22.
- Rajabipour F., Giannini E., Dunant C., Ideker J.H., Thomas M.D., 2015. Alkali–silica reaction: current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. *Cement and Concrete Research* 76: 130–146.
- Rivard P., Fournier B., Ballivy G., 2002. The damage rating index method for ASR affected concrete—a critical review of petrographic features of deterioration and evaluation criteria. *Cement, Concrete and Aggregates* 24(2): Paper ID CCA11228_242, 11 str.
- Shayan A., Ivanusec I., 1996. An experimental clarification of the association of delayed ettringite formation with alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Composites* 18(3): 161–170.
- Shayan A., Quick G.W., 1992. Microscopic features of cracked and uncracked concrete railway sleepers. *ACI Materials Journal* 89(4): 348–361.
- Shayan A., Quick G.W., 1994. Alkali-aggregate reaction in concrete railway sleepers from Finland. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Cement Microscopy*, April 11-14, 1994, Richmond, Virginia, str. 69–79.
- Sibbick T., Fenn D., Crammond N., 2003. The occurrence of thaumasite as a product of seawater attack. *Cement and Concrete Composites* 25(8): 1059–1066.
- Sims I., Poole A.B., eds., 2017. *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review*. CRC Press.
- St John D.A., Poole A.B., Sims I., 1998. *Concrete petrography: a handbook of investigative techniques*. Arnold.

- Stanton T.E., 1940. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, 66: 1781–1811.
- Stanton T.E., Porter O.J., Meder L.C., Nicol A., 1942. California experience with the expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Journal Proceedings* 38: 209–236.
- Struble L., Godfrey J., 2004. How sustainable is concrete. In: Wang K. (ed.) *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*. Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, Ames, Iowa, str. 201–211.
- Swamy R.N., 1992. *The alkali-silica reaction in concrete*. Blackie and Son Ltd., Glasgow, 336 str.
- Swamy R.N., Al-Asali M.M., 1988. Engineering properties of concrete affected by alkali-silica reaction. *ACI Materials Journal* 85(5): 367–374.
- Swenson E.G., 1957. A reactive aggregate undetected by ASTM tests. *ASTM Bulletin* 226: 48–51.
- Swenson E.G., Gillott J.E., 1967. Alkali reactivity of dolomitic limestone aggregate. *Magazine of Concrete Research* 19(59): 95–104.
- Šachlová Š., Pertold Z., Šťastná A., Míčka T., 2014. Factors affecting DEF and ASR in the concrete dam at Vrané nad Vltavou. *International Journal of Research in Engineering and Technology* 3(13): 57–62.
- Šachlová Š., Kuchařová A., Pertold Z., Příkryl R., Fridrichová M., 2017. Quantitative assessment of alkali silica reaction potential of quartz-rich aggregates: comparison of chemical test and accelerated mortar bar test improved by SEM-PIA. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 76(1): 133–144.
- Šťastná A., Šachlová Š., Pertold Z., Příkryl R., Leichmann J., 2012. Cathodoluminescence microscopy and petrographic image analysis of aggregates in concrete pavements affected by alkali-silica reaction. *Materials Characterization* 65: 115–125.
- Šťastná A., Nekvasilová Z., Příkryl R., Šachlová Š., 2013. Microscopic examination of alkali-reactive volcanic rocks from the Bohemian Massif (Czech Republic). In: *Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 18-21 August 2013, Kyoto Research Park, Kyoto, Japan, 10 str. (available from <http://www.claisse.info/2013%20papers/data/e548.pdf>)
- Šťastná A., Šachlová Š., Pertold Z., Příkryl R., 2015. Factors affecting alkali-reactivity of quartz-rich metamorphic rocks: Qualitative vs. quantitative microscopy. *Engineering Geology* 187: 1–9.
- Taylor H.F.W., Famy C., Scrivener K.L., 2001. Delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research* 31(5): 683–693.
- Tepponen P., Ericksson B.-E., 1987. Damages in concrete railway sleepers in Finland. *Nordic Concrete Research* 6: 199–209.
- Thomas M.D.A., Rogers C.A., Bleszynski R.F., 2003. Occurrences of thaumasite in laboratory and field concrete. *Cement and Concrete Composites* 25(8): 1045–1050.
- Thomas M., Folliard K., Drimalas T., Ramlochan T., 2008. Diagnosing delayed ettringite formation in concrete structures. *Cement and Concrete Research* 38(6): 841–847.
- Torrenti J.M., Nahas G., 2010. Durability and safety of concrete structures in the nuclear context. In: Castro-Borges P. (ed.) *Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading*. Proceedings of the 6th International Conference on Concrete under Severe Conditions (CONSEC'10), Merida, Yucatan, Mexico, 7-9 June 2010, CRC Press, A.A.Balkema, Leiden, str. 3–18.

- van Aardt J.H.P., Visser S., 1975. Thaumasite formation: a cause of deterioration of Portland cement and related substances, in the presence of sulfates. *Cement and Concrete Research* 5(3): 225–232.
- Van Loon A.J., 2002. The complexity of simple geology. *Earth-Science Reviews* 59: 287–295.
- West G., 1996. *Alkali-aggregate reaction in concrete roads and bridges*. Thomas Telford, London.
- Whittaker M., Black L., 2015. Current knowledge of external sulfate attack. *Advances in Cement Research*. Paper 1400089, 14 str.
- Wigum B.J., 1995. Examination of microstructural features of Norwegian cataclastic rocks and their use for predicting alkali-reactivity in concrete. *Engineering Geology* 40(3-4): 195–214.
- Yang R., Lawrence C.D., Sharp J.H., 1999. Effect of type of aggregate on delayed ettringite formation. *Advances in Cement Research* 11(3): 119–132.